DOI:10.11931/guihaia.gxzw201906050

岩溶槽谷区植被恢复对土壤团聚体有机碳及碳库管理指数的影响[1]

蓝家程[1,2*]，沈艳[3,4]

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院，贵阳 550001；2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心，贵阳 550001；3. 四川省眉山中学，四川 眉山 620010；4. 西南大学 地理科学学院，重庆 400715)

摘 要：为揭示岩溶槽谷区植被恢复对土壤结构、土壤有机碳积累和碳库管理水平的影响，该研究选取了弃耕地、林地和草地 3 种土地利用方式，测定 0~20 cm 土层土壤团聚体组成、土壤有机碳 (SOC)、团聚体有机碳以及土壤易氧化有机碳 (EOC)含量。结果表明：与弃耕地相比，林地和草地土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 、几何平均重量直径 (MGD)和 2~5 mm 团聚体含量显著增加，林地和草地土壤团聚体组成以 2~5 mm 为主，弃耕地以 0.5~1 mm 和<0.25 mm 为主，表明退耕还林还草能够促进土壤团聚体形成和稳定。土壤团聚体有机碳含量呈现出林地>草地>弃耕地，随团聚体粒级增加而增加的趋势，林地和草地以 2~5 mm 团聚体有机碳贡献率最大，弃耕地则以< 0.25 mm 团聚体贡献为主，表明弃耕地转变为林地和草地后，土壤 SOC 积累主要归功于 2~5 mm 有机碳含量的增加，以及团聚体由小粒径向大粒径转变。与弃耕地比较，林地和草地土壤 SOC、EOC 含量和碳库管理指数 (CPMI) 均显著提高，其中土壤 EOC 含量和 CPMI 变化较为明显。土壤 EOC 可作为土壤碳库早期变化的有效指标，CPMI 能够良好的表征植被恢复对土壤 SOC 和 EOC 的影响。

关键词：岩溶槽谷区，植被恢复，团聚体有机碳，碳库管理指数

中图分类号： S153.6　　　　**文献标识码：**A

Effects of vegetation restoration on soil aggregate organic carbon and carbon pool management index in karst trough valley region

LAN Jiacheng[1,2*], SHEN Yan[3,4]

(1. *School of Karst Science, Guizhou Normal University*, Guiyang 550001, China; 2. *State Key Engineering Technology Research Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation of China*, Guiyang 550001, China; 3. *Meishan High School*, Meishan 620010, Sichuan, China; 4. *School of Geography Science, Southwest University*, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to understand the effects of vegetation restoration on soil structure, accumulation of soil organic carbon (SOC) and carbon pool management levels in karst trough valley region. Three land use patterns including abandoned farmland, woodland and grassland

---

基金项目：国家自然科学基金 (41601584)；贵州省科学技术基金 (黔科合 J 字[2015]2111 号) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41601584); Guizhou Province Science and Technology Fund (Qiankehe J [2015]2111]。

作者简介：蓝家程(1986-)，男(壮)，广西都安人，博士，副教授，研究方向为喀斯特生态环境，(E-mail)lanjc2016@163.com。

*通信作者

were chosen. Soil samples at 0-20 cm depth were collected and separated into aggregate size fractions. The aggregate amounts, SOC in whole soils and aggregates and easily oxidized organic carbon (EOC) contents were determined. The results showed that compared with abandoned farmland, the mean weight diameter (MWD), the mean geometric diameter (MGD) and 2-5 mm aggregate amounts significantly increased, but 0.5-1 mm and <0.25 mm aggregate amounts significantly decreased in woodland and grassland. The SOC content in soil aggregates decreased as follows: woodland > grassland > abandoned farmland and generally increased with the increase in aggregate size class. The SOC content was mainly attributed by 2-5 mm aggregate associated organic carbon content in woodland and grassland. But the contribution in abandoned farmland was dominated by <0.25 mm size fraction. The results suggested that SOC accumulation is mainly due to the increase of organic carbon in 2-5 mm aggregate and the conversion from smaller aggregates to larger aggregates. The SOC, EOC content and carbon pool management index (CPMI) in woodland and grassland were greatly improved relative to that of in abandoned farmland. The responses of EOC and CPMI were sensitive to land use changes. Soil EOC can be used as an effective indicator of early changes in SOC status brought about by vegetation changes, and soil CPMI is a good indicator to reflect the impact of vegetation changes on SOC and EOC.
Key words: karst trough valley region, vegetation restoration, aggregates-associated organic carbon, carbon pool management index

土壤团聚体是土壤结构的基本单元，控制着土壤有机碳动态和养分循环 (Six et al., 2004)。土壤团聚体的形成和周转对土壤有机碳的稳定有重要作用 (Blanco & Lal, 2004)，而土壤有机碳是促进团聚体形成及保持稳定性重要胶结剂。土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC)是土壤结构和土壤质量的核心，对土壤理化性质和生物都有重要作用，其很小的变动，有可能对全球 CO_2 浓度及碳平衡产生重要影响 (Davidson＆Janssens, 2006)。土壤 SOC 库中易氧化分解的活性有机碳 (labile organic carbon) 组分为土壤易氧化有机碳 (easily oxidized organic carbon, EOC)，其仅占土壤有机碳很小的比例，直接参与土壤生物化学转化过程 (Wander et al., 1994)，能够更灵敏地反映土壤肥力和土壤有机碳库的变化 (王清奎等, 2005)。因而其对土壤养分循环，大气 CO_2 浓度、有机碳平衡和全球气候变化有重要的意义 (柳敏等, 2006)。土壤活性有机碳仅表征了有机碳的活性部分，土壤有机碳库还包含惰性组分的积累，其不能全面揭示土壤有机碳库的固存特征 (佟小刚等, 2013)。在此基础上，Blair et al.(1995) 提出了碳库管理指数 (carbon pool management index, CPMI) 的概念，该指标综合了土壤 SOC 和 EOC，可以全面反映土壤管理和土地利用等外界条件对土壤有机碳库的影响 (郭宝华等, 2014)。该指标在土地利用方式对土壤有机碳库变化的研究被广泛应用 (郭宝华等, 2014; Lou et al., 2011; 张娇阳等, 2016; 蒲玉琳等, 2017)。

土地利用对土壤团聚体分布和稳定以及团聚体有机碳的影响已成为一个研究热点 (Stanchi et al., 2015; Tang et al., 2016)。土地利用方式、耕作制度、施肥等土壤管理措施的影响首先在大团聚体级别上体现出来，而微团聚体内的有机碳则维持在较稳定水平上 (Six et al., 2004; Yan et al., 2013)。森林转变为农田后，土壤大团聚体有机碳库下降，而微团聚体有机碳库却是增加 (Yan et al., 2013)。许多研究表明，土地利用对土壤 EOC 和 CPMI 产生明显的影响。天然次生林转变为人工林或农用地后，土壤 SOC、EOC 含量和 CPMI 均显著下降 (张仕吉等, 2016)。若尔盖沙化草地经过生态恢复后，均不同程度提高了土壤 EOC 和 SOC 含量，EOC 和 CPMI 可以用于表征生态恢复后土壤质量的变化 (蒲玉琳等, 2017)。黄土丘陵区坡耕地改造后，土壤活性有机碳增加了 36%~136%，CPMI 增加了 42%~192%，提升了土壤碳固持能力 (张娇阳等, 2016)。

中国西南岩溶面积约占国土面积的 5.8% (Jiang et al., 2014)，由于脆弱的地质背景，碳酸盐岩溶蚀造壤能力低，土壤贫瘠 (Xiao et al., 2017)，尤其是不合理的土地利用引起的石漠化成为制约当地发展的重要问题 (Liao et al., 2018)。过度地土地利用和管理导致土壤结构退化，加速了土壤有机碳矿化以及土壤侵蚀 (Tang et al., 2016)。近年来退耕还林和石漠化治理的推行，大量的农用地退耕为林地或草地，土壤有机碳数量、质量和土壤团聚体明显改善。土地利用由裸地或耕地向灌草、灌木和乔木转变，促进了土壤有机碳及组分的积累 (Liu et al., 2015; 廖洪凯等, 2014)。罗友进等 (2011)发现＜0.25 mm 团聚体是土壤有机碳的主要载体，而李娟等 (2013) 研究表明 ＞0.5 mm 的大团聚体是土壤有机碳的主要贡献载体，＜0.25 mm 团聚体有机碳含量最高，其对有机碳的贡献率不足 10%。土地利用方式对土壤团聚体有机碳含量差异及其对全土有机碳的贡献仍然存在不确定性，还需进一步研究。唐夫凯等 (2014) 发现岩溶峡谷区退耕还林明显提高了 0~20 cm 土层有机碳质量分数和密度以及碳库管理水平，尤其以椿树和梧桐林地退耕效果最佳。土地利用/植被恢复对土壤有机碳、团聚体有机碳和碳库管理指数的影响的研究多集中于岩溶峰从洼地 (莫彬等, 2006; 袁海伟等, 2007)、平原 (严毅萍等, 2007) 和峡谷区 (Tang et al., 2016; Liu et al., 2015; 廖洪凯等, 2014; 罗友进等, 2011; 唐夫凯等, 2014)，岩溶槽谷区的研究相对缺乏。因此该研究聚焦两个问题：(1)岩溶槽谷区植被恢复对土壤团聚体结构和土壤质量的影响；(2)不同植被下土壤团聚体有机碳分布规律及不同粒级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献。本文选取重庆中梁山岩溶槽谷区林地、草地和弃耕地 3 种土地利用方式，研究植被恢复对土壤团聚体组成和稳定性，团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献以及土壤碳库管理指数的变化特征，为全面了解和评价不同喀斯特地貌类型生态恢复对土壤碳库及土壤质量的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

重庆市中梁山水口寺岩溶槽谷区位于重庆市北碚区境内，属于中亚热带湿润季风气候，年均降雨量约 1 000 mm，年均气温 18 ℃。岩溶槽谷两翼为砂岩，轴部为紫色页岩，碳酸盐岩发育于背斜核部，受强烈的岩溶作用，碳酸盐岩溶蚀形成“一山两槽三岭”的岩溶景观，海拔高程约 400~700 m。土壤由三叠纪嘉陵江组的岩溶角粒状白云质灰岩发育形成。

1.2 样地及采样

选择研究区弃耕后植被自然恢复的 3 个阶段为对象，玉米地弃耕 2 a 土地为弃耕地，植被以夹蒿 (*Artemisia*) 为主，坡度 5 °~18 °，海拔 552 m，植被覆盖率为 80%；退耕 20 a 草本阶段 (草地)，主要植被类型以白茅 (*Imperata cylindrica*)为主，坡度 6 °~13 °，海拔 572 m，植被覆盖率 100%；退耕 10 a 的乔木阶段 (林地)，主要以柏树 (*Platycladus orientalis*) 为主，坡度 2 °~10 °，海拔 671 m，植被覆盖率为 85%。每种样地设置 3 个 10 m × 10 m 样方，用五点取样法采集 0~20 cm 土样。土样在室内自然风干后，挑去杂质，分别过 60 目土筛待测。

1.3 指标测定

土壤 SOC 采用重铬酸钾外加热法测定 (鲁如坤, 2000)，土壤 EOC 采用 333 mmol • L^{-1} $KMnO_4$ 溶液氧化，分光光度计比色测定，具体步骤为：依据土壤有机碳含量，称取适量土样(保证样品有机碳含量在 15~30 mg) 于 50 mL 离心管中，加入 25 mL 333 mmol • L^{-1} $KMnO_4$ 溶液，振荡 1 h，然后离心 5 min，取上清液稀释 250 倍，同时进行空白实验。稀释液于 565 nm 波长处比色，根据所消耗的 $KMnO_4$ 的量计算 EOC 含量。

土壤团聚体分析采用湿筛法，具体参照 Elliott (1986) 的方法：称取风干土样 100 g 放置于 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm 组成的套筛之上，用水浸泡 5 min 后机械筛分 5 min (上下振幅为 3 cm，每分钟 30 次，分别得到不同粒径的团聚体，于 60 ℃烘干、称重，

<0.25 mm 的团聚体用差量法求得。土样研磨过 60 目筛用于测定团聚体有机碳含量。

1.4 指标计算

本文涉及的指标计算如下：

$$团聚体有机碳贡献率(\%) = \frac{某粒径团聚体有机碳含量 \times 某粒径团聚体含量}{土壤有机碳含量} \times 100\%；$$

$$\mathrm{MWD} = \sum_{i=1}^{n} x_i \times w_i；$$

$$\mathrm{MGD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \times \ln x_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right]；$$

团聚体 MWD 和 MGD 的计算参考 Wei et al. (2012)。式中 MWD 为平均重量直径，MGD 为几何平均直径，W_i 为 i 粒径团聚体重量百分比，X_i 为 i 级团聚体平均直径

碳库管理指标根据土壤 SOC 和 EOC 进行计算，以弃耕地作为参考 (Blair et al., 1995)：

碳库活度(A) = EOC / (SOC－EOC)；

碳库活度指数(AI) = 样品土壤 AI/参考土壤 AI；

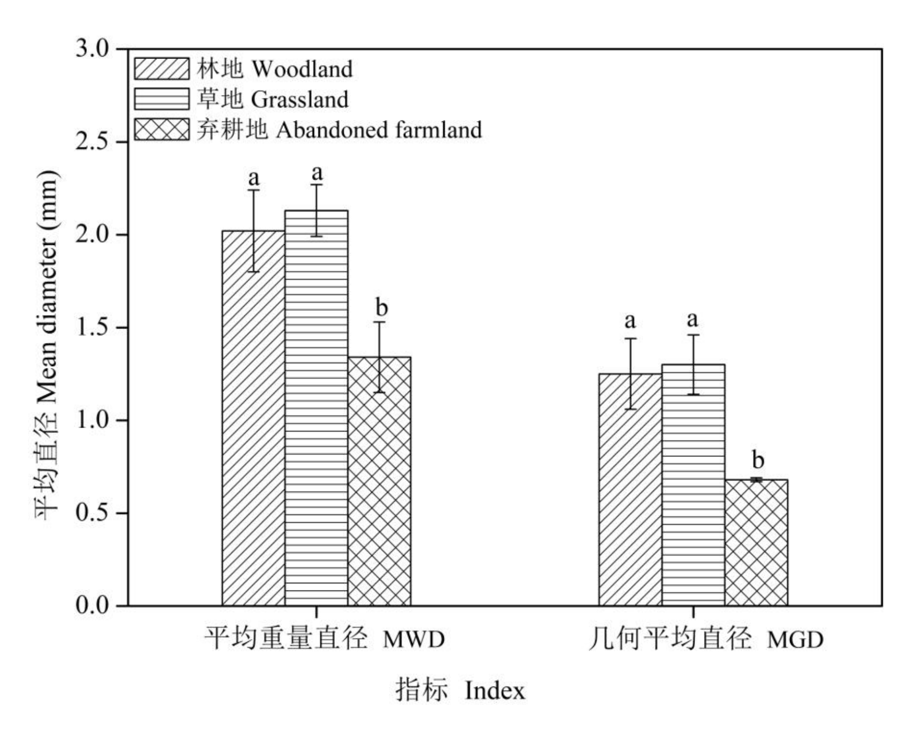
碳库指数(CPI) = 样品土壤 SOC /参考土壤 SOC；

碳库管理指数(CPMI) = CPI×AI×100%。

2 结果与分析

2.1 植被恢复对土壤结构和团聚体分布的影响

MWD 和 MGD 常用来是反映土壤团聚体大小分布状况及其稳定性，MWD 和 MGD 值越大表示团聚体的团聚度越高，越稳定。由图 1 可知，在 0~20 cm 土层，MWD 和 MGD 均表现为林地和草地显著高于弃耕地 (P<0.05)。林地和草地 MWD 分别比弃耕地高 51%和 59%，表明林地和草地土壤团聚体稳定性相对较好。不同植被类型下团聚体组成差异明显(图 2)，各植被类型均以>5 mm 团聚体含量最低，以>0.25 mm 团聚体为主，>0.25 mm 团聚体含量分别为林地 85.17%、草地 85.03%、弃耕地 73.89%。一般来说 >0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体，其含量越高，土壤结构的稳定性越好 (Eynard et al., 2004)。林地和草地以 2~5 mm 团聚体为主，分别达到 44.94%和 44.23%，显著高于弃耕地(P<0.05)；相反，弃耕地以 0.5~1 mm 和<0.25 mm 小团聚体为主，分别为 30.77%和 26.11%，显著高于林地和草地 (P<0.05)。相对于弃耕 2 a 土地，林地和草地 2~5 mm 大团聚体含量、MWD 和 MGD 值显著增加，而<0.25 mm 团聚体却 0.5~1 mm 和显著下降，表明退耕还林还草能够明显改善 0~20 cm 土层的土壤结构，增加土壤团聚体稳定性。



注：不同小写字母表示显著性差异(P <0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters mean significant differences among vegetation types (P< 0.05). The same below.

图 1 不同植被类型土壤团聚体 MWD 和 MGD

Fig. 1 MWD and MGD of soil aggregates in different vegetation types

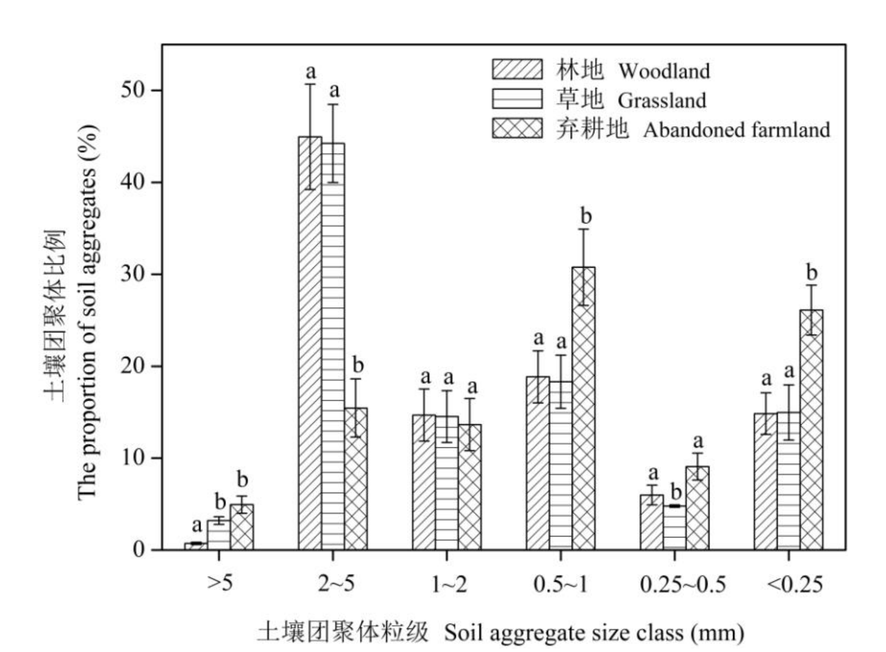


图 2 不同植被类型土壤团聚体分布

Fig. 2 Distribution of soil aggregates sizes in different vegetation types

2.2 植被恢复对土壤团聚体有机碳的影响

弃耕地转变为林地和草地显著增加了土壤团聚体有机碳含量（P<0.05，图 3：A)。不同粒径团聚体有机碳含量均呈现出林地>草地>弃耕地的特征。弃耕地转变为林地和草地后，团聚体有机碳含量分别提高了 131%~156 %，104%~120%，其中以 2~5 mm 提高最为明显，表明 2~5 mm 团聚体有机碳对土壤有机碳的积累有重要的影响。随着团聚体粒径的增加，土

壤团聚体有机碳含量有增加趋势，其中团聚体有机碳含量最高值出现在林地>5 mm 粒径，最低值出现在弃耕地 0.25~0.5 mm 粒径。

不同植被类型下各粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率有一定差异(图 3：B)。>5 mm 团聚体有机碳贡献最小，林地和草地以 2~5 mm 团聚体有机碳贡献率最大，分别为 49.55%和 42.47%，弃耕地则以<0.25 mm 团聚体贡献为主(53.75%)，> 0.25 mm 团聚体有机碳的贡献分别为林地 90%、草地 78.08%、弃耕地 46.25%。这表明，弃耕地转变为林地和草地后，土壤团聚体有机碳主要累积在>0.25 mm 粒径中，尤其是在 2~5 mm 团聚体中；土壤团聚体有机碳由小粒径 (<0.25 mm) 向大粒径团聚体有机碳转移，使得林地、草地土壤有机碳含量增加。

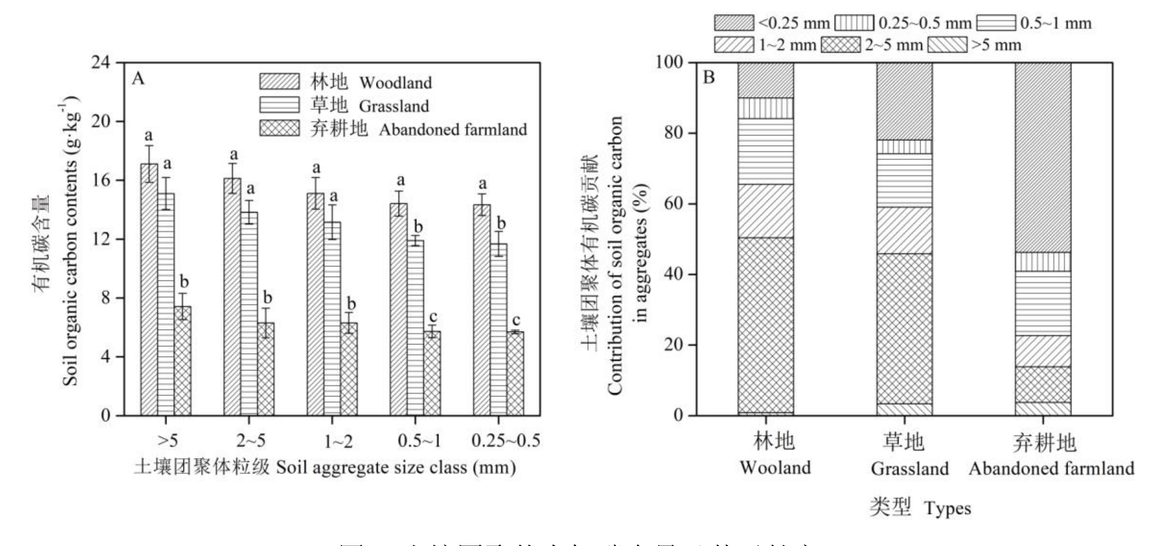


图 3 土壤团聚体有机碳含量及其贡献率

Fig. 3 Contributions of organic carbon in different soil aggregate sizes

2.3 植被恢复对土壤碳库构成及碳库管理指数的影响

弃耕地转变为林地和草地后，土壤 SOC、EOC 含量，EOC/SOC 和 CPMI 均显著提高 (P<0.05, 图 4)。由图 4 可知，土壤 SOC 平均含量大小顺序为林地(14.63 g • kg^{-1}) >草地 (14.4 g • kg^{-1}) >弃耕地 (9.69 g • kg^{-1})，分别显著高出弃耕地 50.9%和 48.6% (P<0.05)；土壤 EOC 平均含量大小顺序为林地 (5.85 g • kg^{-1}) >草地 (4.47 g • kg^{-1}) >弃耕地 (2.94 g • kg^{-1})，分别显著高于弃耕地 98.9%和 51.9% (P<0.05)。表明 EOC 比 SOC 对植被变化更为敏感。EOC/SOC 更能反映土地利用对土壤有机碳行为的影响 (Li et al., 2015)。林地 EOC/SOC 较大，达到 40%，与弃耕地显著差异，而草地 EOC/SOC 与弃耕地无显著差异。

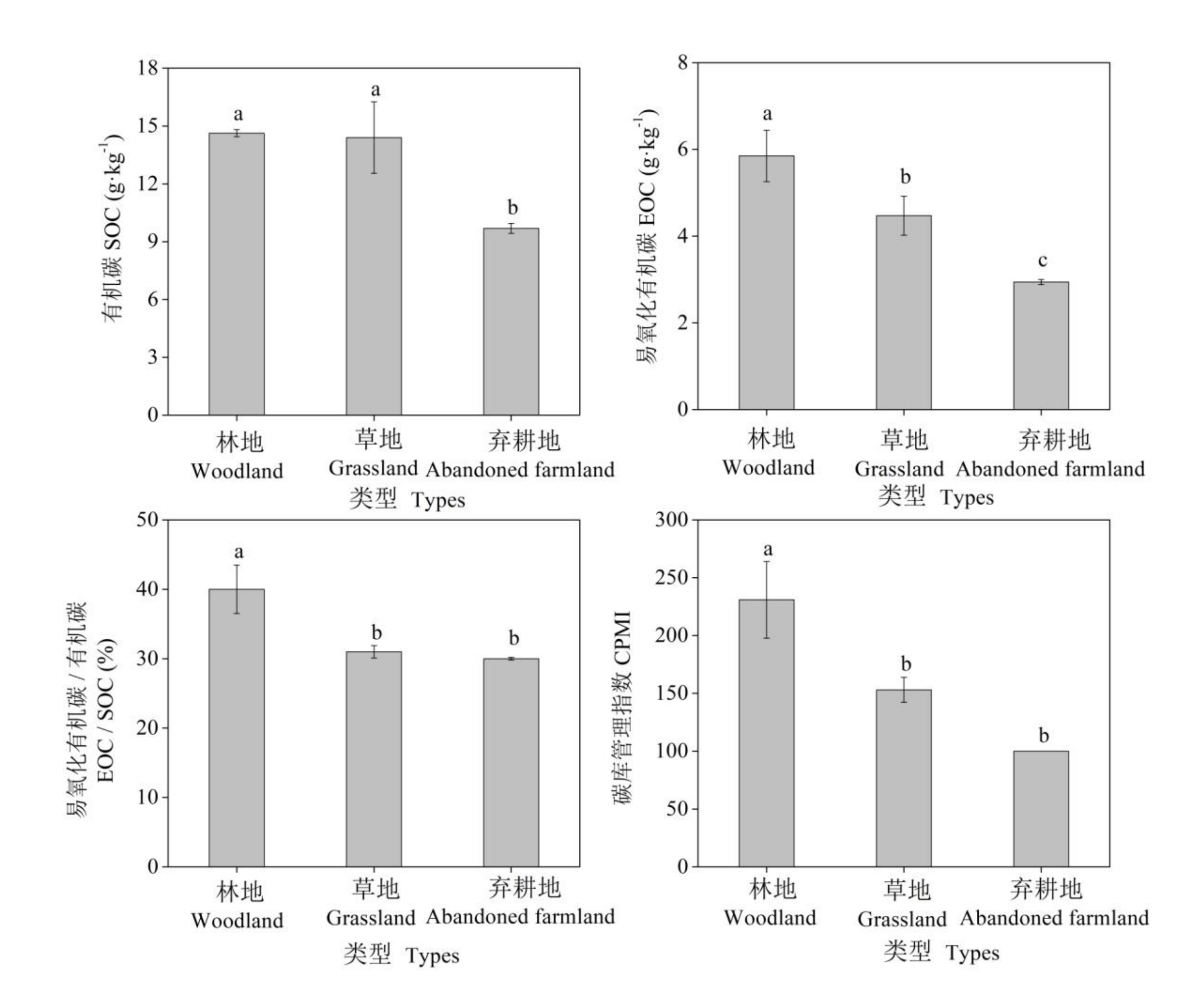


图 4 不同植被类型土壤有机碳(SOC)，易氧化有机碳(EOC)含量，EOC/SOC 和碳库管理指数 (CPMI)

Fig. 4 SOC, EOC concentrations, EOC/SOC and CPMI in different vegetation types

由表 1 可知，由弃耕地转变为林地和草地后，土壤碳库活度 A、碳库活度指数 AI、碳库指数 CPI 和碳库管理指数 CPMI 均增加，而且呈现一致的变化规律，即林地>草地>弃耕地。CPMI 是评价土地利用管理对土壤有机碳变化、土壤质量和土壤肥力的主要指标 (Li et al., 2015; 沈宏等, 2000)。该值越高，表明土壤质量越好，该值降低则表明土地经营不合理，土壤质量下降。林地 CPMI 值为 231，草地为 153，分别比弃耕地高出 130.8%和 53.4%，表明由弃耕地转变为林地和草地后，土壤质量和土壤肥力有较大提升，土壤有机碳库向良性发展。不同土地利用 CPMI 变化趋势与土壤 SOC、EOC 的变化趋势相似，表明 CPMI 对土壤有机碳库及组分的变化敏感。

表 1 不同植被类型土壤碳库管理指标变化

Table 1 Change of soil carbon pool management index in different land use

植被类型 Vegetation types	EOC/SOC (%)	A	AI	CPI	CPMI (%)
林地	40 ±3.54 a	0.67 ±0.1 a	1.53 ±0.24 a	1.51 ±0.02 a	231 ±33 a
草地	31±0.92 b	0.45 ±0.02 b	1.03 ±0.03 b	1.49 ±0.15 a	153 ±10.8 a
弃耕地	30 ±0.22b	0.44 ±0.01 b	1.00 ±0 b	1.00 ±0 b	100 ±0 b

注：**A**. 碳库活度；**AI**. 碳库活度指数；**CPI**. 碳库指数；**CPMI**. 碳库管理指数。不同小写字母表示不同植

被类型之间差异显著(*P*<0.05)。

Note：**A**. Activity of C pool; **AI**. Activity index of C pool; **CPI**. C pool index; **CPMI**. C pool management index. Different lowercase letters mean significant differences among vegetation types (*P* < 0.05).

2.4 相关分析

表 2 表明，该研究不同植被类型土壤团聚体 MWD 与 MGD 显著正相关 (*P*<0.01)，两者与 SOC 显著正相关 (P<0.01)，与 2~5 mm 和>0.25 mm 团聚体含量显著正相关(*P*<0.01)，与<1 mm 团聚体显著负相关。SOC 与 2~5 mm 和>0.25 mm 团聚体含量显著正相关，与 0.5~1 mm 和<0.25 mm 团聚体显著负相关 (*P*<0.01)。SOC 与每一粒级团聚体有机碳含量均显著正相关(*P*<0.01)。

表 2 土壤团聚体参数、团聚体有机碳与全土有机碳关系

Table 2 Correlation between soil aggregate parameters, aggregate associated OC concentrations and SOC

项目 Item		MWD	MGD	SOC	土壤团聚体含量 Soil aggregates content						
					5~10 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	< 0.25 mm	>0.25 mm
	MWD	1	0.978**	0.923**	-0.625	0.979**	0.538	-0.992**	-0.845*	-0.905*	0.978**
	MGD		1	0.945**	-0.701	0.981**	0.482	-0.961**	-0.904**	-0.970**	0.953**
	SOC			1	-0.789	0.960**	0.395	-0.939**	-0.805	-0.947**	0.905*
团聚体有机	5~10 mm			0.953**							
碳含量	2~5 mm			0.902*							
Aggregate	1~2 mm			0.956**							
associated OC	0.5~1 mm			0.926**							
concentrations	0.25~0.5 mm			0.939**							

注：**表示在 *P*<0.01 水平上显著相关，*表示在 *P*<0.05 水平上显著相关。

Note：**indicates significant difference (P<0.01), * indicates significant difference (*P*<0.05).

由表 3 可知，土壤碳库管理指数 CPMI 与 SOC (*P*<0.05)，EOC (*P*<0.01) 显著正相关，CPMI 与 EOC 的关系更为密切。碳库活度 A，碳库活度指数 AI 与 EOC 显著正相关 (*P*<0.05)，与 SOC 相关性不显著。碳库指数与 SOC (*P*<0.01)，EOC (*P*<0.05) 显著正相关。土壤 EOC 和 SOC 显著正相关 (*P*<0.05)。

表 3 不同植被类型土壤碳、碳库管理指数的关系

Table 3 Correlation between soil carbon and soil carbon pool management index in different vegetation types

	SOC	EOC	A	AI	CPI	CPMI
SOC	1					
EOC	0.878*	1				
A	0.508	0.858*	1			
AI	0.504	0.854*	0.999**	1		
CPI	0.994**	0.870*	0.497	0.489	1	
CPMI	0.812*	0.988**	0.927**	0.924**	0.785	1

注：**SOC**. 土壤有机碳；**EOC**. 易氧化有机碳；**A**. 碳库管理指数；**AI**. 碳库活度指数；**CPI**. 碳库指数；**CPMI**. 碳库管理指数。**表示在 *P*<0.01 水平上显著相关，*表示在 *P*<0.05 水平上显著相关。

Note：**SOC**. Soil organic carbon; **EOC**. Easily oxidized organic carbon; **A**. Activity of C pool; **AI**. Activity index of C pool; **CPI**. C pool index; **CPMI**. C pool management index; **indicates significant difference (*P*<0.01), * indicates significant difference (*P*<0.05).

3 讨论

上述研究结果表明，弃耕地转变为林地和草地显著增加了 2~5 mm 团聚体含量、MWD 和 MGD 值)，表明弃耕地转变为林地和草地后，土壤团聚体由小粒级向大粒级转变，退耕还林还草能够改善土壤结构和团聚体稳定性。胡阳等 (2015) 研究发现岩溶峰丛洼地中，草地、灌丛、林灌中 >0.25 mm 的水稳性团聚体明显高于荒地，但没有明显的粒级均显著增加。而在黔西南岩溶峡谷区，不同生态系统土壤团聚体以 >5 mm 粒级为主，其次为 2~5 mm 粒级，林、灌、草生态系统 >5 mm 团聚体含量大于旱地，而 2~5 mm，<0.25 mm 团聚体含量则显著小于旱地，也证明了旱地转为林、草地后，土壤颗粒由小粒径向大粒径发生了转移 (谭秋锦等, 2014)。此外，Tang et al. (2016) 研究也发现贵州花江峡谷区，与弃耕 1 a 裸地比较，林地和草地 MWD、MGD、>0.25 mm 团聚体含量显著增加，促进了土壤团聚体的形成和稳定。植被恢复后，团聚体结构和稳定性改善主要是因为林地和草地没有人为耕作，增加了凋落物输入、根系生物量，从而促进了土壤颗粒的团聚 (Wei et al., 2013; 姜敏等, 2016)。相反，耕地刚弃耕 2 a，弃耕地在弃耕之前长期耕作而导致团聚体的破坏，土壤恢复较慢，导致弃耕地土壤团聚体稳定性较差。毁林后，土壤大团聚体被破坏，团聚体稳定性显著下降，造林后土壤恢复速度相对于森林破坏后更慢 (Wei et al., 2013)。毛艳玲等 (2008) 指出，福建低山丘陵地带林地转变为农田后，> 2 mm 团聚体数量明显下降，<0.25 mm 团聚体含量显著上升，团聚体稳定性下降。该研究发现不同土地利用方式 MWD、MGD 值与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量显著正相关，说明土壤中 >0.25 mm 团聚体含量越高，团聚体稳定性越好。这一结果与广西平果县果化镇典型岩溶峰丛洼地不同土地覆被>0.25 mm 水稳性团聚体含量与 MWD、MGD 显著正相关一致。MWD、MGD 值和 2~5 mm、1~2 mm 团聚体含量有相似的变化，且 MWD、MGD 值和 2~5 mm 粒径含量显著正相关 (表 2，R=0.979, P<0.01; R=0.981, P<0.01)，表明与 2~5 mm 大团聚体的增加，促进了土壤团聚体的稳定。土壤有机碳是影响土壤团聚体分布的重要因素，该研究中 SOC 与 2~5 mm 和>0.25 mm 团聚体含量显著正相关，与 0.5~1 mm 和 <0.25 mm 团聚体显著负相关。以上表明，耕地转为林草地后，土壤颗粒由小粒径向大粒径转化，而不同岩溶地貌类型，不同植被类型，则可能表现为不同粒径之间的转化。

植被变化显著影响了不同粒径团聚体有机碳、全土 SOC 和 EOC 含量。该研究林地和草地中团聚体有机碳、全土 SOC 和 EOC 含量均显著高于弃耕地。这主要是因为，林地和草地具有较高的植被覆盖，以及大量的凋落物和根系生物量的输入，弃耕地虽然有一定的枯草输入，但弃耕 2 a，对土壤的改变缓慢。土壤团聚体的形成和周转对土壤有机碳的稳定有重要作用 (Blanco et al., 2004)。该研究表明土壤团聚体有机碳含量随团聚体粒径的增加有增加趋势。这一结果与赵世伟等 (2006) 一致，这一结果符合 Elliott (1986) 的团聚体形成机理：大团聚体有机碳含量大于小团聚体，因为大团聚体由小团聚体和有机粘合物进一步团聚形成的。不同粒级团聚体有机碳变化规律没有固定的规律，不同研究的结果不一致。在贵州岩溶峡谷区的研究发现不同植被类型或土地利用土壤有机碳主要分布在<0.25 mm 粒径中，随团聚体粒径增加，土壤有机碳含量减小 (Tang et al., 2016; 罗友进等, 2011)。而在黔南峡谷区，团聚体有机碳在水田、旱地和草地中，随粒径的减小呈递增的变化规律，在灌丛和次生林中，则随粒径的减小呈先降低后增加的规律 (谭秋锦等, 2014)。另外，在广西环江岩溶峰丛洼地，利用方式不同，团聚体有机碳含量呈波浪型或“V”形分布。这可能是因为不同土地利用方式由于有机物料的输入和输出不同，导致了其土壤物理性状和微生物活性差异，从而影响土壤有机碳在各粒径团聚体的分布 (罗友进等, 2011)。

土壤团聚体有机碳的分布与全土有机碳含量关系密切，不同植被类型下，2~5 mm 和 1~2 mm 团聚体有机碳含量与全土有机碳含量显著正相关，1~5 mm 团聚体有机碳对全土有机碳

的贡献最大，是主要贡献载体 (李娟等, 2013)。该研究中 2~5 mm 团聚体有机碳分别占全土有机碳 49.55%和 42.47%，是全土有机碳的主要贡献载体，而弃耕地则以< 0.25 mm 团聚体贡献为主(53.75%)。团聚体有机碳对全土有机碳的贡献一方面与团聚体分布有关，另一方面与团聚体有机碳含量相关 (Wei et al., 2013)。该研究发现各粒径团聚体有机碳与全土有机碳显著正相关，林地和草地 2~5 mm 团聚体含量和团聚体有机碳含量均较高，均与全土有机碳显著正相关，因此其对全土有机碳贡献最大；弃耕地以< 0.25 mm 团聚体有机碳含量最低，但其团聚体数量最大，对全土有机碳贡献最大。因此由弃耕地转变为林地和草地土壤有机碳积累主要是因为 <0.25 mm 团聚体有机碳转向 2~5 mm 大团聚体中，因此土壤有机碳的积累主要是归功于 2~5 mm 大团聚体有机碳的积累。这与李娟等 (2013) 的研究结果相似。

该研究 3 类土地利用方式下土壤 EOC 含量差异可能与植被凋落量、根系生物量、管理措施等因素有关。林地具有大量的凋落物，其分解可补充 EOC 的消耗，草地根系生物量丰富，弃耕地由于弃耕不久，植被覆盖低，杂草零星分布，植物残体输入量有限。因此不同土地利用方式改变了 SOC 输入的数量和质量，进而影响土壤 EOC 含量 (张仕吉等, 2016)。EOC/SOC 和碳库活度 A 可表征土壤有机碳质量和稳定程度，EOC/SOC 越高，表明有机碳活性越高，稳定性越差，容易被微生物分解矿化，反之土壤有机碳库越稳定 (佟小刚等, 2013)。该研究林地 EOC/SOC 最高，弃耕地最低，表明弃耕地 SOC 活度较低，其自身被分解矿化的潜力小，但由于有机碳输入量有限，弃耕不久，新碳补充较缓慢，导致其 EOC/SOC 最低。佟小刚等 (2013) 发现，退耕还林 40 a 时，活性有机碳占总有机碳的比例和碳库活度 A 比退耕初始都提高了，表明退耕还林提升了土壤碳库的活性和转化过程。另外的研究表明，人工林地活性有机碳比例均大于荒地和旱耕地 (唐国勇等, 2011)。不同植被类型下，EOC/SOC 的变化趋势与 EOC、SOC 和 CPMI 的变化有些差异。因此，该研究中 EOC/SOC 可能不能准确表征土壤有机碳的质量。CPMI 可以全面反映土壤管理和土地利用等外界条件对土壤有机碳库的影响，CPMI 与 SOC、EOC 的变化趋势一致，并且与土壤 SOC、EOC 呈显著正相关，表明 CPMI 能够系统和敏感地反映土壤 SOC 和 EOC 的变化。CPMI 还可以反映和评价土地利用管理对土壤土壤质量和土壤肥力的影响 (Li et al., 2015; 沈宏等, 2000)。该研究林地的 CPMI 最高，其次是草地，弃耕地最低，说明林地和草地的土壤质量和有机碳库向良性发展。这一结果与唐夫凯等 (2014)一致，该研究认为退耕还林提高土壤碳库水平。因此土壤碳库管理水平与土地利用和植被恢复密切相关，在石漠化治理过程中应尽量减少人为干扰，增加植被覆盖。

4 结论

(1) 岩溶槽谷区退耕还林还草显著提高了土壤结构和团聚体稳定性，促进土壤有机碳和团聚体有机碳积累。土壤结构改善与土壤团聚体的稳定主要与 2~5 mm 大团聚体粒径增加有关，土壤有机碳的积累一方面与团聚体数量有关，另一方面主要是因为有机碳由<0.25 mm 团聚体有机碳转向 2~5 mm 大团聚体中。

(2) 土壤 SOC、EOC 含量和 EOC/SOC 均呈现林地>草地>弃耕地，林地和草地显著提升了土壤 SOC 和 EOC 的含量，提高了土壤碳库活性和转化过程。

(3) 不同植被类型土壤 CPMI 表现为林地>草地>弃耕地，表明林地和草地土壤有机碳库和质量处于良性管理状态。CPMI 与土壤 SOC、EOC 含量变化显著正相关，而且 EOC 含量变化和 CPMI 变化更为明显，说明 EOC 可作为土壤碳库变化的早期指标，CPMI 能够良好的表征植被变化对土壤 SOC 和 EOC 的影响。

参考文献:

BLAIR GJ, LEFROY RDB, LISLE L, 1995. Soil carbon fractions based on the degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Aust J Agric Res, 46: 1459-1466

BLANCO-CANQUI H, LAL R, 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates [J]. Critical Rev in Plant Sci, 23(6): 481-504.

DAVIDSON EA, JANSSENS IA, 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 440: 65-173.

ELLIOTT ET, 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Sci Soc Amer J, 50: 627-633.

EYNARD A, SCHUMACHER TE, LINDSTROM MJ, et al., 2004. Aggregate sizes and stability in cultivated south dakota prairie ustolls and usterts [J]. Soil Sci Soc Amer J, 68(4):1360-1365.

GUO B H, FAN S H, DU M Y, et al., 2014. Effect of land-use type on soil labile carbon pool and carbon management index [J]. Chin J Ecol, 3(3): 723 -728. [郭宝华, 范少辉, 杜满义, 等, 2014. 土地利用方式对土壤活性碳库和碳库管理指数的影响 [J]. 生态学杂志, 3(3): 723 -728.]

JIANG M, LIU Y, LIU C, et al., 2016. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou reservoir[J]. J Soil Water Conserv, 30(6): 265-270. [姜敏, 刘毅, 刘闯, 等, 2016. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分型特征 [J]. 水土保持学报, 30(6): 265-270.]

JIANG Z, LIAN Y, QIN X, 2014. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration [J]. Earth-Sci Rev, 132: 1-12.

LI J, LIAO HK, LONG J, et al., 2013. Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas [J]. Acta Ecol Sin, 33(7): 2147-2156. [李娟, 廖洪凯, 龙健, 等, 2013. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响 [J]. 生态学报, 33(7): 2147-2156.]

LI ZW, NIE X D, CHEN XL, et al., 2015. The effects of land use and land scape position on labile organic carbon and carbon management index in red soil hilly region, southern China [J]. J Mt Sci, 12(3): 626-636.

LIAO H K, LI J, LONG J, et al., 2014. Effects of land use and abandonment on soil labile organic carbon in the karst region of Southwest China [J]. Environ Sci, 35(1): 240-247. [廖洪凯, 李娟, 龙健, 等, 2014. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响 [J]. 环境科学, 35(1): 240-247.]

LIAO HK, ZHENG CL, LI J, et al., 2018. Dynamics of soil microbial recovery from cropland to orchard along a 20-year chronosequence in a degraded karst ecosystem [J]. Sci Total Environ, 639: 1051-1059.

LIU M, YU W T, JIANG ZS, et al., 2006. A research review on soil active organic carbon [J]. Chin J Ecol, 25(1): 1412-1417. [柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等, 2006. 土壤活性有机碳 [J]. 生态学杂志, 25(1): 1412-1417.]

LIU SJ, ZHANG W, WANG KL, et al., 2015. Factors controlling accumulation of soil organic carbon along vegetation succession in a typical karst region in Southwest China [J]. Sci Total Environ, s521-522 (1): 52-58.

LOU Y, XU M, WANG W, 2011. Soil organic carbon fractions and management index after 20 year of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables [J]. Soil Use Manag, 27: 163-169.

LU RK, 2000. Analytical method of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House. [鲁如坤, 2000. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社.]

LUO YJ, WEI CF, LI Y, et al., 2011. Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area [J]. Acta Ecol Sin, 31(1): 257-266. [罗友进, 魏朝富, 李渝, 等, 2011. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响 [J]. 生态学报, 31(1): 257-266.]

MAO YL, YANG YS, XING SH, et al., 2008. Effects of land use on soil organic carbon in water- stable aggregates

[J]. J Soil Water Conserv, 22(4): 132-137. [毛艳玲, 杨玉盛, 刑世和, 等, 2008. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响 [J]. 水土保持学报, 22(4): 132-137.]

MO B, CAO JH, XU XM, et al., 2006. Changes of soil active organic carbon under different land use types in karst area [J]. Ecol Environ, 15(6): 1224-1230. [莫彬, 曹建华, 徐祥明, 等, 2006. 岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响 [J]. 生态环境, 15(6): 1224-1230.]

PU YL, YE C, ZHANG SR, et al., 2017. Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige [J]. Acta Ecol Sin，37(2) : 367-377. [蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 等, 2017. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化 [J]. 生态学报, 37(2): 367-377.]

SHEN H, CAO ZH, XU ZH, et al., 2000. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils[J]. Acta Pedol Sin, 37(5): 1 66-173. [沈宏, 曹志洪, 徐志红, 2000. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响 [J]. 土壤学报, 37(5): 1 66-173.]

SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, DENEF K, 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil Till Res, 79: 7-31.

STANCHI S, FALSONE G, BONIFACIO E, 2015. Soil aggregation, erodibility, and erosion rates in mountain soils (NW Alps, Italy) [J]. Solid Earth, 6: 403-414.

TAN QJ, SONG TQ, PENG WX, et al., 2014. Stability and organic carbon characteristics of soil aggregates under different ecosystems in karst canyon region [J]. Chin J Appl Ecol, 25(3): 671-678. [谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等, 2014. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体有机碳稳定性及有机碳特征 [J]. 应用生态学报, 25(3): 671-678.]

TANG FK, CUI M, ZHOU JX, et al., 2014. Difference analysis of soil organic carbon pool in different forestlands returned from farmlands in karst gorge area [J]. Sci Soil Water Conserv, 12(4): 1-7. [唐夫凯, 崔明, 周金星, 等, 2014. 岩溶峡谷区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析 [J]. 中国水土保持科学, 12(4): 1-7.]

TANG FK, CUI M, LU Q, 2016. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region [J]. Solid Earth, 7: 141-151.

TANG GY, LI K, SUN YY, et al., 2011. Effects of land uses on soil organic carbon and carbon pool management index [J]. For Res, 24(6): 754-759. [唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等, 2011. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. 林业科学研究, 24(6): 754-759.]

TONG XG, HAN XH, YANG GH, et al., 2013. Carbon management index as an indicator for changes in soil organic carbon pool under conversion from cropland to forestland [J]. Chin Environ Sci, 33(3): 466-473. [佟小刚, 韩新辉, 杨改河, 等, 2013. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用 [J]. 中国环境科学, 33(3): 466-473.]

WANDER MM, TRAINA SJ, STINNER BR, et al., 1994. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools [J]. Soil Sci Soc Amer J, 58: 1130-1139.

WANG QK, WANG SL, FENG ZW, et al., 2005. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecol Sin, 25(3): 513-519. [王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等, 2005. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系 [J]. 生态学报, 25(3): 513-519.]

WEI XR, LI XZ, JIA XX, et al., 2013. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland [J]. Biol Fert Soils, 49: 637-646.

XIAO K, HE T, CHEN H, et al., 2017. Impacts of vegetation restoration strategies on soil organic carbon and nitrogen dynamics in a karst area, southwest China [J]. Ecol Eng, 101: 247-254.

XIAO SS, YE YY, ZHANG W, et al., 2016. Carbon and nitrogen contents in calcareous soil aggregates affected by disturbance and land use in karst region, China [J]. Chin Environ Sci, 35(5): 1140-1146. [肖霜霜, 叶莹莹, 张伟, 等, 2016. 干扰/利用方式对喀斯特石灰土团聚体分布及其碳氮含量的影响 [J]. 生态学杂志,

35(5): 1140-1146.

YAN X, ZHOU H, ZHU QH, et al., 2013. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China [J]. Soil Till Res, 130: 42-51.

YAN YP, CAO JH, YANG H, et al., 2012. The impact of different soil type on soil organic carbon pool and turnover in karst area [J]. J Soil Water Conserv, 26(2): 144-149. [严毅萍，曹建华，杨慧，等, 2012. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳碳库及周转时间的影响 [J]. 水土保持学报, 26(2): 144-149.]

YUAN HW, SU YR, ZHENG H, et al., 2007. Distribution characteristics of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression landuse of karst region [J]. Chin Environ Sci, 26(10): 1579-158. [袁海伟，苏以荣，郑华，等，2007. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征 [J]. 生态学杂志, 26(10) : 1579-158.]

ZHANG JY, LIANG CT, DONG CP, et al., 2016. Characteristics of soil carbon components and carbon pool management indices in different land uses in loess hilly region [J]. Res Soil Water Conserv, 23(4): 66-69,76. [张娇阳，梁楚涛，董昌平，等，2016. 黄土丘陵区不同土地利用下土壤碳组分及碳库管理指数特征 [J]. 水土保持研究, 23(4): 66-69,76.]

ZHANG SJ, XIANG WH, SUN WJ, et al., 2016. Effects of land use on soil readily oxidized carbon and carbon management index in hilly region of central Hunan Province [J]. Ecol Environ Sci, 25(6): 911-919. [张仕吉，项文化，孙伟军，等, 2016. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响 [J]. 生态环境学报, 25(6): 911-919.]

ZHAO SW, SU J, WU JS, et al., 2006. Changes of soil aggregate organic carbon during process of Vegetation Restoration in Ziwuling [J]. J Soil Water Conserv, 20(3): 114-117. [赵世伟，苏静，吴金水，等, 2006. 子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化 [J]. 水土保持学报, 20(3): 114-117.]